Magnetisme

Magnetisme is een van de belangrijkste krachten in ons heelal. Ondanks het feit dat wij het wezen van dit verschijnsel nog niet helemaal begrijpen maken wij er dagelijks gebruik van. Bovendien, zonder magnetisme zou ons heelal in de huidige vorm niet bestaan!

Auteur: Jos Verstraten, Landgraaf, Nederland
Email: josverstraten@live.nl
Publicatiedatum: 17-02-2022

Een kort historisch overzicht

De oudheid
Het verschijnsel magnetisme was al bekend in de oudheid. Men had ontdekt dat bepaalde stenen, magnetiet genoemd, in staat waren ijzeren voorwerpen aan te trekken. De chemische formule van dit magnetiet is Fe_3O_4 en het is een veel voorkomende vorm van roest ofwel ijzererts. Het woord '*magneet*' is van het oud-Grieks λίθος Μάγνης, (lithos magnēs) afgeleid en betekent letterlijk '*magnetische steen*'.
In Europa schijnt het Thales van Miletus te zijn geweest die rond 600 voor onze jaartelling voor het eerst op een voor die tijd wetenschappelijke manier heeft nagedacht over het verschijnsel magnetisme. In een oud Indiaas medisch handboek '*Sushruta Samhita*', verschenen vele eeuwen voor onze jaartelling, wordt zelfs beweerd dat magnetiet stenen in staat zijn ijzeren pijlpunten uit lichamen te verwijderen. Ook in de Chinese literatuur van eeuwen voor ons jaar nul werd al opgemerkt dat een of andere kracht ijzer naar magnetiet trekt. In de twaalfde eeuw werd gebruik gemaakt van uit magnetiet gevormde wijzers, die op kurk dreven in een schaal met water, om te navigeren op het aardmagnetisch veld. Uiteraard begreep men toen nog niet hoe dit verschijnsel was te verklaren.

De klassieke mechanica gaat er zich mee bemoeien
In 1600 komt de grote doorbraak. In dat jaar publiceerde Wiliam Gilbert zijn '*De Magnete, Magneticisque Corporibus, et de Magno Magnete Tellure*' waarin een aantal conclusies wordt getrokken uit experimenten met magnetiet magneten. Die conclusies zijn:

- Er bestaan twee soorten magneten, die elkaar kunnen aantrekken of afstoten.
- Gelijksoortige magneten stoten elkaar af, ongelijksoortige trekken elkaar aan.
- De aarde zélf bevat ook twee ongelijksoortige magneten. De ene zit ergens in de noordpool, de andere ergens in de zuidpool.
- De aarde-magneten oefenen overal op de planeet hun invloed uit, waardoor van magnetiet gemaakte kompasnaalden altijd naar het noorden wijzen.

Niet veel later werd duidelijk dat die twee magneten in feite één magneet vormen, die wel twee polen heeft die elkaar aantrekken of afstoten. De begrippen noordpool en zuidpool werden gemeengoed.
Dat er een verband bestaat tussen magnetisme en elektriciteit werd in 1819 ontdekt door Hans Christian Ørsted. Deze kwam er per toeval achter dat een koperen draad, waardoor een elektrische stroom vloeit, een in de nabijheid opgestelde kompasnaald beïnvloedt.
In de volgende decennia stortten wereldberoemde wetenschappers zich op dit verschijnsel. Ampère, Gauss, Biot, Savart, Faraday: langzaam maar zeker werd het verband tussen magnetisme en elektriciteit geëxploreerd, begrepen en praktisch toegepast.

De vergelijkingen van Maxwell
In 1865 werd door James Clerk Maxwell het definitieve bewijs geleverd van het feit dat magnetisme en elektriciteit twee aspecten van een en hetzelfde verschijnsel zijn: het elektromagnetisme. Hij legde dit verband wiskundig vast in zijn vier beroemde '*vergelijkingen van Maxwell*'. Deze hebben wij, voor de aardigheid, in de onderstaande afbeelding samengevat. Het zal duidelijk zijn dat iemand zonder wiskundige scholing hier helemaal niets van begrijpt (wij ook niet, trouwens). Dat wij deze vergelijkingen hier toch even weergeven heeft niet alleen te maken met het feit dat deze formules wereldberoemd zijn geworden, maar ook het begin betekenden van een volledig nieuw soort natuurkunde. De klassieke mechanica werd verlaten, de weg was vrijgemaakt voor de veldmechanica, ook wel kwantummechanica genoemd. Helaas betekende dat ook het einde van het intuïtief aanvoelen van de natuur. Alleen zij die een flinke dosis wiskunde beheersen kunnen deze nieuwe mechanica begrijpen.
Ook de al even beroemde relativiteitstheorie van Einstein was een rechtstreeks gevolg van deze vier vergelijkingen.

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \rho \qquad \nabla \cdot \mathbf{B} = 0$$

$$\nabla \times \mathbf{B} - \frac{1}{c}\frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = \frac{\mathbf{j}}{c} \qquad \nabla \times \mathbf{E} + \frac{1}{c}\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = 0$$

De vier beroemde vergelijkingen van Maxwell.
(© Sander Bais en Gijs Mathijs Ontwerpers, Amsterdam)

Maar... wat is magnetisme nu in feite?

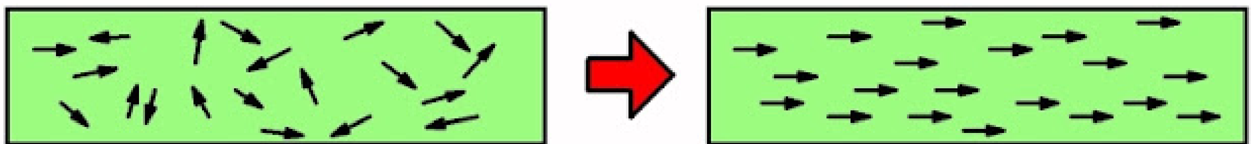
Dat kan alleen de kwantummechanica verklaren!
Met dit kort historisch overzicht is de meest belangrijke vraag nog niet beantwoord. Wat is magnetisme en hoe ontstaan het? Dat zijn twee vragen waar de klassieke mechanica geen antwoord op heeft en die alleen beantwoord kunnen worden door wiskundig diep in de beginselen van de kwantummechanica te duiken. Wij geven hier een leken-interpretatie van deze ingewikkelde theorie.

Spinnende elektronen
Zoals u weet bestaat de materie uit atomen. Die atomen zijn weer opgebouwd uit een kern en rond deze kern draaiende elektronen. Een van de eigenschappen van deze elektronen is dat zij een '*spin*' hebben. In de populaire lectuur wordt die spin opgevat als een draaiing van het elektron rond haar as. Dat is echter niet het wezen van de elektronenspin. Het is een fundamentele kwantummechanische grootheid die op geen enkele wijze met de klassieke mechanica is te beschrijven en dus ook niet op een intuïtief aan te voelen manier is uit te leggen.
Aan deze spin worden bepaalde '*kwantumgetallen*' gekoppeld die zowel positief als negatief kunnen zijn. Het kwantumgetal van de spin van elektronen is gelijk aan +½ of -½. In plaats van positief en negatief werkt men ook wel met de notaties ↑ en ↓. Men heeft ontdekt dat de spin van een elektron rond dit deeltje een krachtenveld creëert. Dit noemt men de '*elektromagnetische kracht*' en dit is een van de vier fundamentele krachten in de natuur.
Een kracht die op een voorwerp inwerkt is echter een vectoriële grootheid die uitsluitend in een welbepaalde richting werkt. U kunt bijvoorbeeld een stoel naar links of naar rechts verplaatsen. Die beweging wordt veroorzaakt door twee identieke krachten de u in verschillende richtingen uitoefent. Die verschillende richtingen worden voorgesteld door vectoren.
Nu terug naar het atoom. De richtingen waarin deze kracht zich kan uiten noemt men de magnetische veldlijnen. Die magnetische veldlijnen vormen samen het magnetisch veld. De meeste elektronen in atomen komen echter in paren voor en wel zo dat één elektron een

positief spingetal +½ heeft en het andere een even groot negatief spingetal -½. (↑↓). Beide krachtenvelden compenseren elkaar, het resultaat is nul.

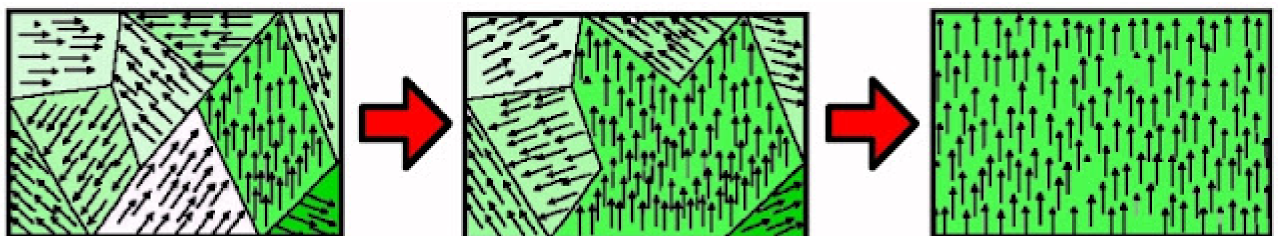
De verschillende elektronen orbitalen
Elektronen in een atoom bevinden zich op verschillende energieniveaus. Die niveaus noemt men de '*orbitalen*' en deze worden aangeduid door de letters s, p, d en f.
In iedere orbitaal komen elektronen in paren voor. Zo kunnen in de d-orbitaal bijvoorbeeld 10 elektronen zitten, vijf sets van ieder twee gepaarde elektronen ↑↓.
Er bestaan echter atomen waar de elektronen zich niet allemaal in paren schikken. Zo heeft bijvoorbeeld een ijzer-atoom (formule Fe) 26 elektronen. Op het hoogste energieniveau hebben sommige elektronen allemaal dezelfde spin. Het gevolg is dat er een netto elektromagnetische kracht overblijft die de basis vorm van het feit dat ijzer magnetisch kan worden.

Elementaire magneetjes
In ieder ijzeratoom ontstaat dus een klein krachtje als gevolg van het overschot aan elektronen met de ene of de andere spin. In natuurlijke toestand zijn die kleine krachtjes van de individuele atomen echter allemaal in een andere richting gericht. Daardoor werken zij elkaars werking tegen en is er aan de buitenkant van het ijzer geen effect merkbaar. Als zo'n stuk ijzer echter in het veld van een magneet komt, bijvoorbeeld in het magnetisch veld van de aarde, dan worden al die elementaire krachten in een en dezelfde richting gericht. Daardoor gaan deze krachten elkaar versterken en resulteert er een duidelijk merkbare kracht, die rond het ijzer de lijnen van het veld gaat volgen.



De elementaire krachten van magneetjes in een staaf ijzer, ongericht en gericht.
(© 2022 Jos Verstraten)

Weiss-domeinen
Weiss ontdekte in 1907 dat de magnetische krachtvectoren van individuele atomen ook zonder inwerking van een extern krachtenveld in heel kleine begrensde maar willekeurige gebieden parallel gericht zijn. Deze gebieden worden '*Weiss-domeinen*' genoemd. De grootte van deze domeinen is 10^{-8} tot 10^{-6} m en er bevinden zich ongeveer 10^{6} tot 10^{9} atomen binnen elk domein. De richting van de magnetisering in één domein wordt bepaald door het kristalrooster van het materiaal. Bij het aanleggen van een extern krachtenveld gaat de oriëntatie van de individuele krachtvectoren langzaam maar zeker parallel lopen aan de richting van het externe veld. Bij dit proces gaan ook de grenzen tussen de Weis-domeinen veranderen. De domeinen worden groter tot er tot slot maar één groot domein overblijft.
Als het extern veld wegvalt blijft het overheersende domein bestaan, tenzij de temperatuur van het materiaal een bepaalde grens overschrijdt, lees later.



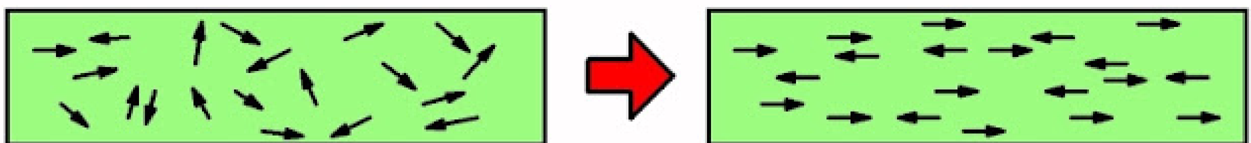
De Weis-domeinen gaan langzaam over in één groot domein.
(© 2004 Wikimedia Commons, geëdit door Jos Verstraten)

Soorten magnetisme

Acht verschillende soorten
Er bestaan acht verschillende soorten fundamenteel magnetisme:
- Ferromagnetisme
- Antiferromagnetisme
- Ferrimagnetisme
- Diamagnetisme
- Paramagnetisme
- Metamagnetisme
- Elektromagnetisme
- Aardmagnetisme

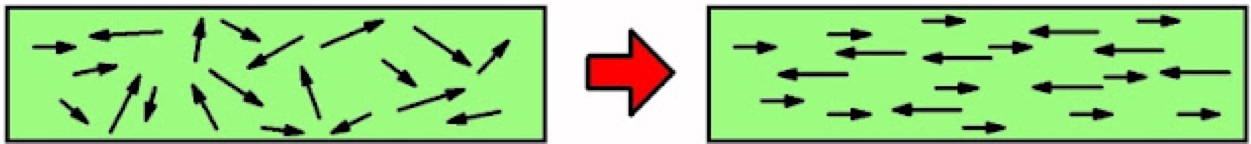
Ferromagnetisme
In materialen die ferromagnetisme vertonen doen zich de verschijnselen voor die in de bovenstaande paragraafjes zijn besproken. In de atomen zijn willekeurig gerichte ongepaarde elektronen aanwezig die, onder invloed van een externe magnetische kracht, een tendens vertonen om zich te schikken volgens lijnen die evenwijdig lopen aan de krachtlijnen van het externe veld.
Ferromagnetisme wordt slechts bij de volgende chemische elementen aangetroffen: ijzer (Fe), nikkel (Ni), kobalt (Co) en sommige zeldzame aardmetalen zoals neodynium (Nd), gadolinium (Gd) en samarium (Sm). Ook legeringen van deze elementen onderling en met andere metalen vertonen ferromagnetische eigenschappen.
Men maakt een onderscheid tussen '*zachte*' en '*harde*' ferromagnetische materialen. Zachte materialen zoals gegloeid ijzer zijn gemakkelijk te magnetiseren maar verliezen hun magnetisme weer vrij snel. Harde ferromagnetische materialen behouden hun magnetisme veel en veel langer.

Antiferromagnetisme
Bij dit soort materialen gaan de krachtenvectoren van de ongepaarde elektronen niet in dezelfde richting wijzen, maar paarsgewijs in tegengestelde richtingen. Deze '*magneten*' hebben dus een netto magnetisch moment van nul, zij kunnen geen extern veld genereren. Deze eigenschap wordt voornamelijk waargenomen bij extreem lage temperaturen.



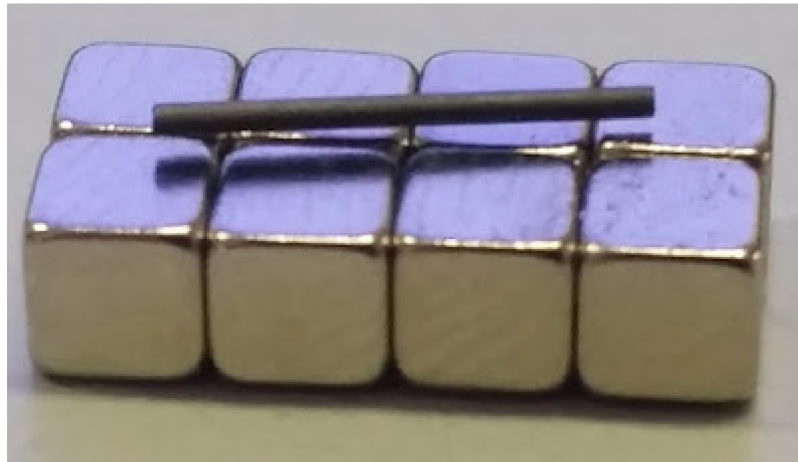
De krachtenvectoren bij antiferromagnetisme. (© 2022 Jos Verstraten)

Ferrimagnetisme
Ferrimagnetisme is een bijzondere vorm van antiferromagnetisme. Bij antiferromagneten is de sterkte van de kracht van de elkaar tegenwerkende naburige spins gelijk, bij ferrimagnetische materialen is dit niet het geval. De krachten in één richting zijn groter dan de krachten in de andere richting. Een ferrimagneet gedraagt zich dus in de praktijk net zoals een ferromagneet. U merkt extern een netto magnetische kracht.
De oorsprong van ferrimagnetisch gedrag wordt toegeschreven aan de zogenaamde kwantummechanische '*exchangekracht*' tussen elektronen die maar een paar kristalroosters van elkaar zijn verwijderd. Deze kracht werk in tegengestelde richting van de kracht die een gevolg is van de elektronenspin.
Ferrimagnetisme kan uitsluitend ontstaan in materialen met subroosters. Atomen met een grotere spinmoment wisselen zich in het rooster af met atomen met een kleiner spinmoment.
In de dagelijkse elektronica praktijk komt u ferrimagnetische materialen tegen onder de vorm van allerlei ferrieten. Dat zijn gesinterde ceramische materialen met als basis ijzeroxide (Fe_2O_3).



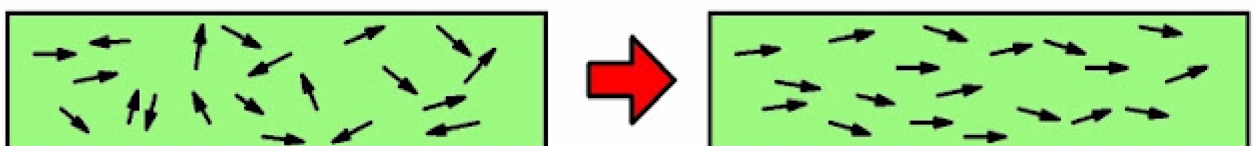
De krachtenvectoren bij ferrimagnetisme. (© 2022 Jos Verstraten)

Diamagnetisme
Diamagnetisme is de eigenschap van materialen om zich te verzetten tegen een extern aanwezige magnetische kracht. De atomen van dergelijke materialen hebben geen ongepaarde elektronen. Door allerlei ingewikkelde kwantummechanische verschijnselen worden diamagnetische materialen zelfs afgestoten door een extern magnetisch veld. Zo'n veld veroorzaakt in het materiaal een veld in tegenovergestelde richting en het gevolg is dat er een afstotende kracht ontstaat. Dit verschijnsel werd reeds in 1778 ontdekt door Antonius Brugmans, uiteraard zonder hiervoor een verklaring te vinden. Een supergeleidend materiaal werkt als een sterke diamagneet omdat het een extern magnetisch veld volledig buitensluit. Hierdoor ontstaan de meest vreemdsoortige verschijnselen. Lichte diamagnetische materialen kunnen gaan zweven boven een sterk magnetisch veld. In de onderstaande foto ziet u hoe het grafiekstaafje uit een potlood zweeft boven en sterk extern magnetisch veld, opgewekt door een aantal neodynium magneten aan elkaar te koppelen. Dit verschijnsel wordt '*diamagnetische levitatie*' genoemd.



Een voorbeeld van diamagnetische levitatie.
(© 2018 Wikimedia Commons)

Paramagnetisme
Bij paramagnetische materialen zal er, bij beïnvloeding door een extern magnetisch veld, een gedeeltelijke ordening van de individuele spin krachten optreden. Er wordt dus een beperkte vorm van magnetisatie geïnduceerd. Dit zorgt ervoor dat een paramagneet in een zeer geringe mate een aantrekkende kracht van het uitwendige veld ondervindt. In sommige gevallen is het paramagnetisme echter zo zwak dat het diamagnetisme van alle overige elektronen overweegt. Als het extern magnetisch krachtenveld wegvalt, verliezen de individuele spin krachten hun oriëntatie en gaan weer over naar de ongeordende toestand. Een typisch voorbeeld van een paramagnetisch element is zuurstof (O_2).

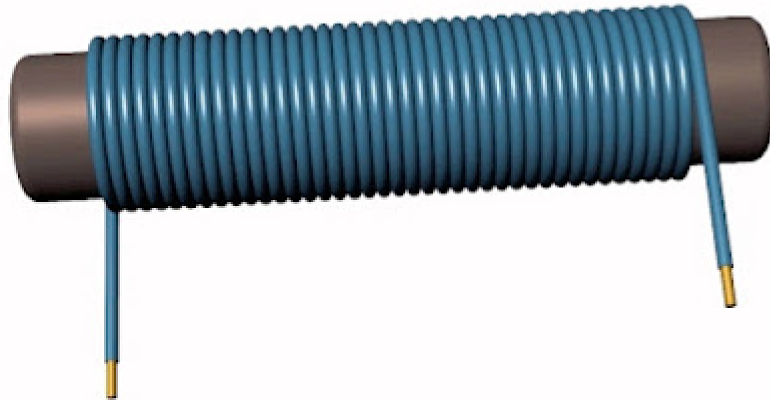


De krachtenvectoren bij paramagnetisme. (© 2022 Jos Verstraten)

Metamagnetisme
Metamagnetisme is een plotselinge en zeer sterke toename van de magnetisatie van een materiaal door een relatief kleine verandering in een extern aangelegd magnetisch veld. Het

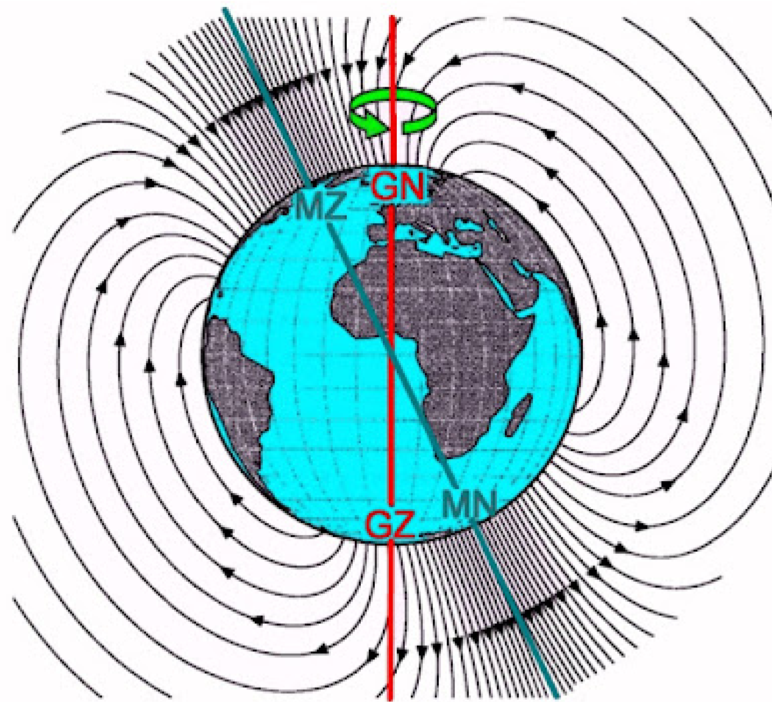
metamagnetische gedrag kan heel verschillende fysieke oorzaken hebben voor verschillende soorten metamagneten, maar de verklaringen zitten diep verborgen in de kwantummechanische theorie.

Elektromagnetisme
Elektromagnetisme ontstaat in een materiaal als het extern magnetisch veld wordt gegenereerd door een elektrische stroom die door een draad of een spoel vloeit. Het magnetisch veld verdwijnt als de stroom wordt uitgeschakeld. Elektromagneten bestaan in de meeste gevallen uit een groot aantal windingen van zeer dunne koperdraad, die zo dicht mogelijk tegen elkaar op een spoelkoker rond het magnetisch materiaal worden gewikkeld. Het groot voordeel van een elektromagneet is dat het magnetisch veld kan worden gegenereerd alleen als het noodzakelijk is door de stroom door de spoel in of uit te schakelen.



Een typisch voorbeeld van een elektromagneet.
(© 2010 Wikimedia Commons)

Aardmagnetisme
De planeet aarde kan worden opgevat als een grote magneet. De magnetische zuidpool (lees verder) ligt ergens in het noorden van Canada, de magnetische noordpool ligt ergens in Antarctica. ***Noteer dus goed dat de magnetisch zuidpool (MZ) ergens in de buurt van de geografische noordpool (GN) ligt!*** Er bestaat een hoek van ongeveer 9,6° tussen de aardas GN/GZ en de as van het aardmagnetisme MZ/MN. Dit wordt de '*magnetische declinatie*' genoemd. De plaatsen van de polen veranderen heel langzaam van positie. De plek waar de magnetisch zuidpool uit het aardoppervlak treedt verplaatst zich bijvoorbeeld elke dag met ongeveer 90 meter naar het westen, richting Siberië.
Het aardmagnetisch veld ontstaat door het mengsel van vloeibaar ijzer en nikkel dat in de buitenkern van de aarde aanwezig is. Doordat de aarde draait en de buitenkern vrij stroperig is, ontstaat er een verschil tussen de hoeksnelheid van de vaste kern en de hoeksnelheid van de vloeibare buitenkern. Door dit mechanisme ontstaat een magneetveld. Dit zal duidelijk worden als wij in het volgende artikel uit deze serie het verschijnsel '*elektromagnetisme*' bespreken.
Het aardmagnetisch veld beschermt al het leven op de planeet aarde tegen elektrisch geladen deeltjes uit de ruimte die onder andere afkomstig zijn van de zon. Deze deeltjes worden door het veld afgebogen naar de polen. De geladen deeltjes gaan daar interacties aan met de atomen in de atmosfeer. Het gevolg van deze botsingen is dat er elektromagnetische straling in het zichtbaar spectrum wordt uitgezonden. Deze straling ervaren wij als het poollicht.



Een voorstelling van het aardmagnetisme.
(© Roel Hendriks, geëdit door Jos Verstraten)

Permanente magneten

Wat is een permanente magneet?
Een permanente magneet, de naam zegt het in feite al, is een magneet waarvan het magnetisch veld continu aanwezig is. Deze eigenschap ontstaat doordat de magneet is samengesteld uit een ferromagnetisch materiaal waarin de spin van alle ongepaarde elektronen hetzelfde is gericht. Een tweede reden waarom zij permanent worden genoemd is het feit dat zij, onder normale omstandigheden, gedurende een zeer lange tijd hun magnetische eigenschappen behouden.
Permanente magneten hebben de eigenschap dat zij een kracht uitoefenen op de omgeving waardoor zij voorwerpen, gemaakt van ijzer, nikkel of kobalt, kunnen aantrekken.

Niet hittebestendig!
Permanente magneten verliezen, boven een bepaalde temperatuur, hun magnetisme. Lees verder bij 'Curie-temperatuur'.

Soorten van permanente magneten
In de praktijk kent met staafmagneten, hoefijzermagneten, kompasnaalden en schijfmagneten. Van sommige materialen kan men echter ook zeer willekeurig gevormde magneten maken.



Diverse vormen van permanente magneten. (© 2022 Jos Verstraten)

De grondstoffen van permanente magneten
Permanente magneten worden tegenwoordig gemaakt uit de volgende materialen:
- Alnico magneten
- Ferriet magneten
- Samarium-kobalt magneten
- Neodymium magneten
- Flexibele magneten

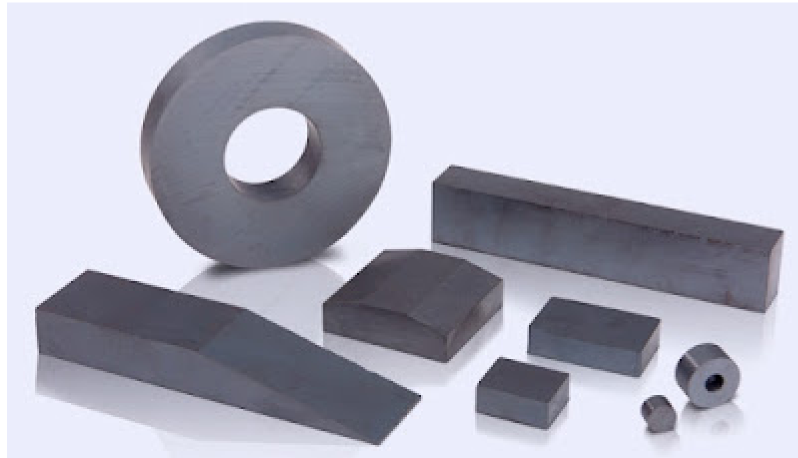
Alnico magneten
Alnico magneten bestaan uit een legering van ijzer, aluminium, nikkel en kobalt. Het voordeel van deze legering is dat de magneten gegoten kunnen worden, waardoor allerlei ingewikkelde vormen mogelijk zijn. De legeringsmetalen zorgen ervoor dat het gegoten ijzer minder bros wordt. Alnico magneten zijn bruikbaar tot temperaturen van ongeveer 450°C. Een groot voordeel van deze magneetsoort is dat het materiaal niet roest en dat het vrijwel inert is. Dat wil zeggen dat het nauwelijks chemisch reageert met andere materialen. Een ander voordeel is dat het materiaal, vanwege zijn amorfe structuur, gemakkelijk te coaten is met bijvoorbeeld verf.
Alnico magneten worden onder andere gebruikt in elektromotoren, gitaarelementen, sensoren voor brandstoftoevoer, luidsprekers en ABS-remsystemen in auto's. De meeste hoefijzer- en staafvormige magneten die u overal kunt kopen zijn gemaakt uit alnico.



Diverse vormen van alnico magneten. (© Alibaba)

Ferriet magneten
Ferriet magneten zijn de meest geproduceerde magneten. Ze bestaan voor het grootste

gedeelte uit keramische gesinterde ijzerpoeders, bijvoorbeeld strontium-ferriet (SrFe), waardoor magneten van ferriet ook wel keramische magneten worden genoemd. Zij zijn goedkoop te produceren en worden toegepast in massaproducten, zoals bijvoorbeeld in luidsprekers, microfoons en speelgoed. Ook de klassieke bordmagneten die in scholen, kantoren en thuis zijn aan te treffen, zijn vrijwel allemaal gemaakt van ferriet.
Ferriet magneten zijn vanwege hun donkergrijze kleur eenvoudig te herkennen. In tegenstelling tot andere permanente magneten hebben ze vanwege hun corrosievrij materiaal namelijk geen coating.
Deze magneten zijn bruikbaar van -40 °C tot 250 °C. Een voordeel van magneten van ferriet is dat zij onder extreme omstandigheden lang goed blijven en niet aangetast worden door logen en zouten. Een nadeel is dat zij mechanisch niet zo sterk zijn en bijvoorbeeld bij een val in stukken kunnen breken.



Diverse vormen van ferriet magneten.
(© Goudsmit Magnetics)

Samarium-kobalt magneten
Deze magneten worden gemaakt uit een legering van het zeldzame aardmetaal samarium en kobalt ($SmCo_5$). Zij werden in de jaren zestig van de vorige eeuw ontwikkeld door Karl Strnat in een Amerikaans legerlaboratorium. Zij zijn de op één na sterkste magneten die er bestaan. De magneetkracht van een samarium-kobalt magneet is bijvoorbeeld vijf tot zeven groter dan deze van een vergelijkbare ferriet magneet.
Deze permanente magneten worden voornamelijk toegepast in omgevingen waar men rekening moet houden met hoge temperaturen. Ze hebben namelijk een werktemperatuur tot 350 °C en behouden tot op deze temperatuur zeer stabiele magnetische eigenschappen. Een andere toepassing van deze magneten in gebruik in de medische technologie, zoals bij implantaten en prothesen en lichaamssensoren.
Een nadeel van deze magneten is dat zij vrij prijzig zijn.

Neodymium magneten
Ook deze magneten zijn gebaseerd op een zeer zeldzaam aardmetaal, namelijk neodymium (Nd). Dit metaal wordt verwerkt in een legering met ijzer en borium tot NdFeB.
Neodymium magneten worden soms '*supermagneten*' genoemd, omdat zij de sterkste magneten zijn die tot nu toe zijn ontwikkeld. Zij worden tegenwoordig vrijwel overal toegepast waar om de een of ander reden een sterk magneetveld noodzakelijk is. Zij zijn verkrijgbaar in de vorm van schijven, blokken en ringen. Neodymium magneten zijn echter roestgevoelig en dus, zonder coating, alleen geschikt voor binnengebruik. Soms worden zij voorzien van een stalen of rubber ommanteling, zodat zij waterdicht zijn en tóch buiten kunnen worden toegepast.
Een groot nadeel van neodymium magneten is dat zij niet bestand zijn tegen temperaturen die hoger zijn dan 80 °C.



Diverse vormen van neodymium magneten.
(© Goudsmit Magnetics)

Flexibele magneten
Dergelijke magneten zijn gemaakt uit tot poeder vermaalde ijzersnippers, gemengd met een polymere binder. Dit half vloeibare mengsel wordt tussen rollen platgewalst (*calendering*) of door een matrijs geperst (*extrusie*). Het resultaat is een rubberachtige flexibel vel dat magnetische eigenschappen kan hebben en waarvan de dikte afhangt van het fabricage procéde. Dit vel kan ook nog zelfklevend worden gemaakt, waardoor talloze nuttige toepassingen ontstaan.
Het nadeel van deze magneten is wel dat zij niet erg krachtig zijn en niet bestand zijn tegen hoge temperaturen.



Flexibele magneten. (© HS Mag)

Het magnetiseren van de permanente magneet
Het basismateriaal waaruit een permanente magneet is gemaakt is niet uit zichzelf magnetisch. Het basismateriaal is immers slechts ferromagnetisch en moet nu nog gemagnetiseerd worden. Daarvoor moet een proces worden uitgevoerd dat '*magnetiseren*' wordt genoemd.
Het basismateriaal wordt verhit tot zeer hoge temperaturen en blootgesteld aan een sterk extern magnetisch veld. Dit heeft tot gevolg dat de spin krachten in de Weiss-domeinen allemaal in dezelfde richting worden uitgericht. Als dat het geval is zegt men dat de magneet '*verzadigd*' is. Het materiaal wordt nadien langzaam afgekoeld, waarbij de richting van de krachten in de domeinen behouden blijkt. Het materiaal wordt dan '*anisotropisch*' genoemd omdat de eigenschappen niet meer in alle richtingen identiek zijn.

Eigenschappen van permanente magneten

Een permanente magneet is een dipool
Iedere permanente magneet heeft twee '*polen*', een noordpool en een zuidpool. Vandaar dat

men een magneet een '*dipool*' noemt. Deze twee polen zijn niet van elkaar te scheiden. Als u een staafmagneet doorzaagt ontstaan twee kleinere staafmagneten met ieder weer een noord- en een zuidpool. Tot nu toe zijn er geen magnetische monopolen, dus iets met uitsluitend een noord- of een zuidpool, ontdekt. Sommige ingewikkelde theorieën van de kwantummechanica gaan er echter wél van uit dat dergelijke voorwerpen moeten bestaan, ergens in een voor ons verborgen deel van het heelal.
Bij de meeste magneten wordt de noordpool weergegeven in een rode kleur en de zuidpool in een blauwe of groene kleur.

De krachtwerking van magneten
Twee magneten zullen elkaar aantrekken als u de noordpool van de ene in de buurt van de zuidpool van de andere houdt. Als u de twee magneten met de gelijknamige polen tegen elkaar probeert te drukken zult u een tegenwerkende kracht ondervinden. Bij sterke magneten, zoals neodymium magneten, is het vaak zelfs absoluut onmogelijk om twee zuid- of twee noordpolen tegen elkaar te duwen, zo sterk is de tegenwerkende kracht. Het is dus duidelijk dat dit krachtenveld op afstand werkt.

Magnetische influentie
Als u een magneet in de buurt van een niet magnetisch voorwerp van ijzer, nikkel of kobalt houdt zal dit voorwerp tijdelijk ook een magneet worden. Het is die eigenschap die ervoor zorgt dat magneten voorwerpen van ijzer, nikkel of kobalt aantrekken. Aan de kant van de noordpool van de magneet ontstaat namelijk de zuidpool van het voorwerp. En die twee tegengestelde polen trekken elkaar uiteraard aan! Dit verschijnsel wordt '*magnetische influentie*' genoemd.

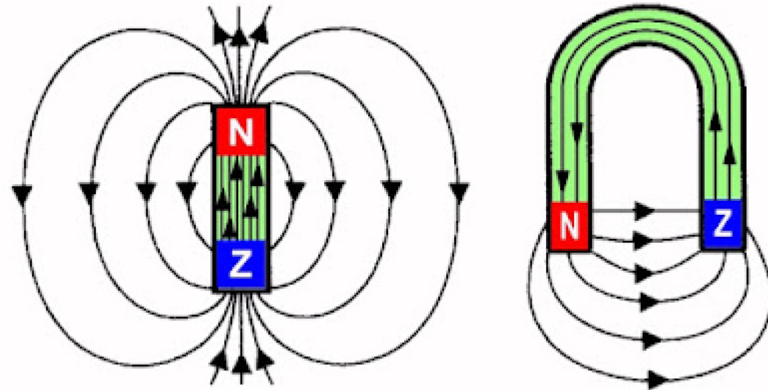
Zélf magnetiseren
Dank zij het verschijnsel magnetische influentie kunt u bijvoorbeeld een schroevendraaier tijdelijk zó magnetisch maken dat de kop van een (ijzeren) boutje er aan blijft plakken. Handig als u dit boutje op een moeilijk toegankelijke plaats door een gaatje moet duwen. Daarvoor hebt u alleen een sterke magneet nodig. Als u geen losse magneet hebt kunt u ook de magneet van een luidspreker gebruiken. De achterzijde van de luidspreker komt overeen met een van de polen van de magneet.
Strijk één pool van de magneet herhaaldelijk ***in dezelfde richting*** langs de schroevendraaier. Hoe vaker u dit doet, hoe meer gemagnetiseerd het staal zal worden. Ga zolang door tot het boutje goed aan de schroevendraaier blijft plakken.



Magnetiseren van een schroevendraaier. (© WikiHow)

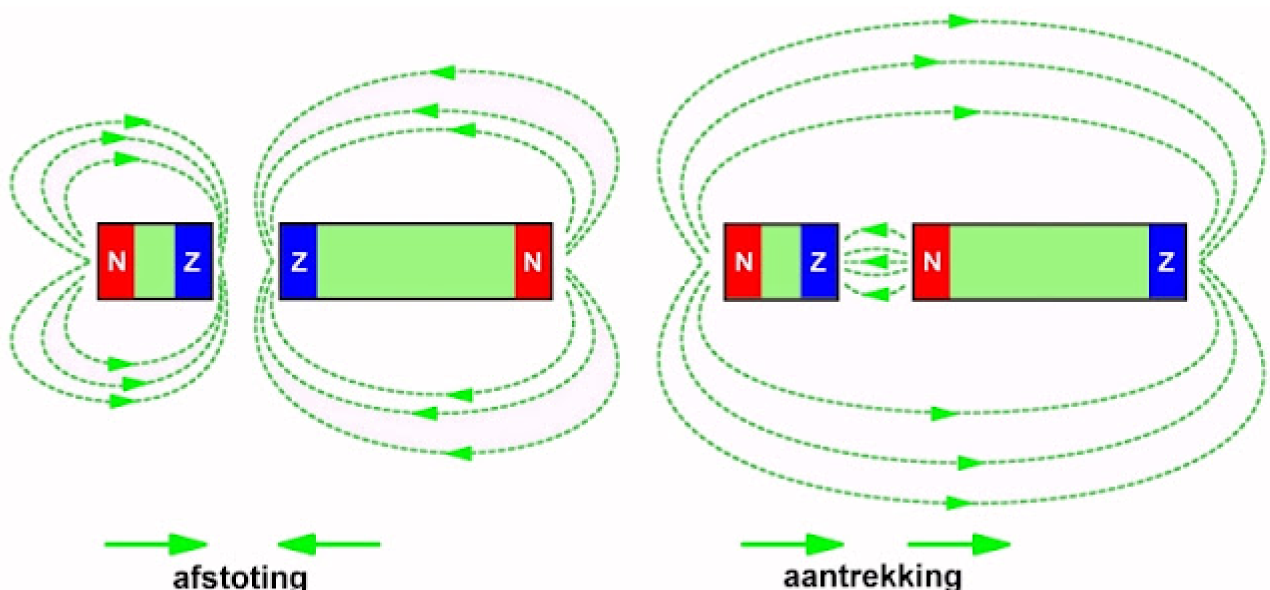
Magnetische veldlijnen
Hoe is het te verklaren dat een noordpool een zuidpool aantrekt? Zoals reeds uitgelegd in dit artikel ontstaat de magnetische kracht door de samenbundeling van de kleine

elektromagnetische krachten die ontstaan door de spin van ongepaarde elektronen. Die krachten uiten zich in een bepaalde richting en in een bepaalde zin. Die richtingen worden de '*magnetische veldlijnen*' genoemd en al die veldlijnen vormen samen het magnetisch veld rond de magneet. In een staafmagneet zélf lopen de krachtlijnen evenwijdig en is de zin gericht van de zuidpool naar de noordpool. Buiten de magneet verspreiden de veldlijnen zich in de ruimte rond de magneet en de zin is daar gericht van de noord- naar de zuidpool. De veldlijnen hebben dus geen begin en geen einde maar vormen een gesloten pad.
Hoe sterker de magneet, hoe dichter de veldlijnen bij elkaar liggen.



De veldlijnen in en rond een staaf- en een hoefijzermagneet.
(© Roel Hendriks, geëdit door Jos Verstraten)

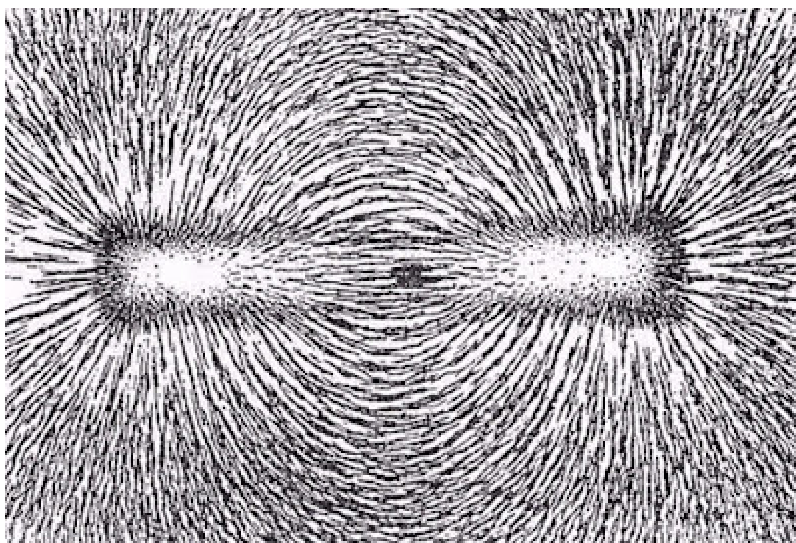
Aantrekken en afstoten verklaard
De magnetische veldlijnen zijn dus paden in de ruimte waarlangs de krachten hun invloed uitoefenen. Uit het feit dat de krachtenvectoren gericht zijn van de noord- naar de zuidpool is goed te verklaren waarom twee noord- of zuidpolen elkaar afstoten en waarom een noord- en een zuidpool elkaar aantrekken. Dit is fraai toegelicht in de onderstaande figuur. Uit de richting van de krachtenvectoren blijkt duidelijk de afstotende en aantrekkende werking.



Het aantrekken en afstoten verklaard. (© 2006 T.R. Kuphaldt, geëdit door Jos Verstraten)

Experimenteel bewijs van het bestaan van de magnetische veldlijnen
Misschien denk u nu '*die Jos Verstraten kan mij veel proberen wijs te maken, wie bewijst dat die krachtlijnen écht op een zo merkwaardige manier rond een magneet zitten?*'. Dat kunt u zélf op een heel eenvoudige manier aantonen. Het enige dat u daarvoor nodig hebt is een staafmagneet, een velletje karton en een potje zo fijn mogelijk ijzervijlsel. Zo'n potje ijzervijlsel van honderd gram kunt u bijvoorbeeld bij www.supermagnete.nl kopen voor het luttele bedrag van € 7,83. Een staafmagneet van 100 mm bij 15 mm kost bij hetzelfde bedrijf € 16,61. Leg de magneet op een houten tafel en leg het velletje karton over de magneet. Strooi voorzichtig

en gelijkmatig het ijzervijlsel over het oppervlak van het kartonnen vel. U verwacht dat het vel gelijkmatig wordt bedekt met het vijlsel. Niets is echter minder waar! Het ijzervijlsel 'hecht' zich aan de magnetische veldlijnen en het onderstaande wonderbaarlijke patroon verschijnt op het karton.



Het ijzervijlsel wordt aangetrokken door de veldlijnen van de magneet. (© 2007 Wikimedia Commons)

De Curie-temperatuur
De Curie-temperatuur, genoemd naar Pierre Curie, is de temperatuur waarboven ferromagnetische materialen geen permanent magneetveld meer bezitten. Dit is een gevolg van de bewegingen in willekeurige richtingen van de atomen, waarvan de intensiteit afhankelijk van de temperatuur van de atomen. Vanwege deze heftige bewegingen is er geen globale richting in het veld te ontdekken, de stof verliest zijn magnetisme. Boven de Curie-temperatuur gedraagt het materiaal zich paramagnetisch.
Bij het verhogen van de temperatuur zorgt de temperatuurbeweging dus voor het geleidelijk doorbreken van de orde in de uitlijning van de spin kracht vectoren. Bij de Curie-temperatuur stort de ordening volledig in elkaar doordat de thermische energie groter is geworden dan de energie van de magnetische wisselwerking. De krachten vectoren wijzen weer in willekeurige richtingen zodat er geen resulterend extern magneetveld aanwezig is.
Het is wel mogelijk de magneet, na afkoeling, opnieuw te magnetiseren.
In de onderstaande tabel zijn de Curie-temperaturen voor de meest gebruikte ferromagnetische elementen en legeringen samengevat.

NAAM	SYMBOOL	CURIE-TEMPERATUUR
gadolinium	Gd	19 °C
neodymium	Nd	310 °C ~ 340 °C
nikkel	Ni	354 °C
ferriet		450 °C
ijzer	Fe	770 °C
samarium-kobalt		750 °C ~ 825 °C
AlNiCo		850 °C
kobalt	Co	1.115 °C

De Curie-temperatuur van ferromagnetische materialen. (© 2022 Jos Verstraten)

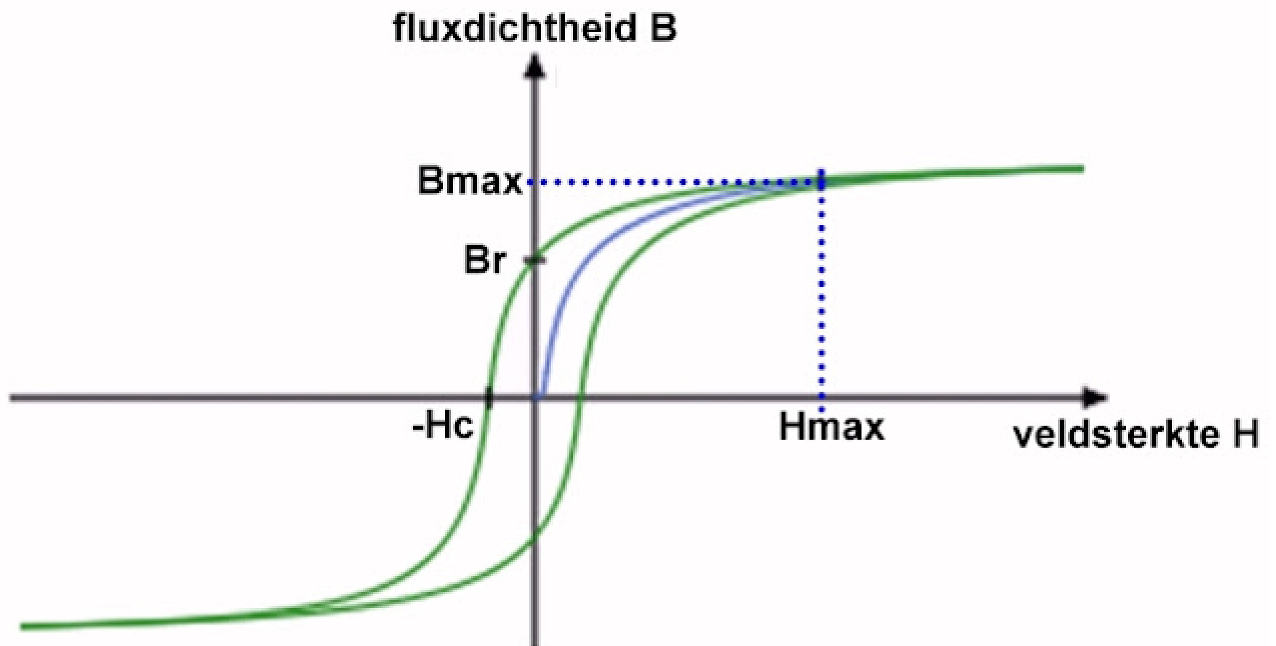
Het Curie-verschijnsel is er ook verantwoordelijk voor dat bijvoorbeeld een ijzeren staafje niet meer aangetrokken wordt door een magneet als het warmer wordt dan de Curie-temperatuur. De reeds beschreven magnetische influentie vindt dan niet meer plaats en het ijzeren staafje verliest zijn magnetische eigenschappen. Van dit verschijnsel wordt bijvoorbeeld gebruik gemaakt in de soldeerbouten van Weller voor het regelen van de temperatuur van de punt. In de punt zit een staafje dat, als de punt van de bout heter wordt dan de Curie-tempertuur van dat staafje, niet meer wordt aangetrokken door een permanente magneet en een contact verbreekt.

De magnetische fluxdichtheid B
Niet iedere magneet is even sterk en het is logisch dat men gezocht heeft naar een grootheid om de sterkte van een magnetisch veld uit te drukken. Die grootheid is de '*magnetische fluxdichtheid*' met als symbool B. Deze grootheid beschrijft de grootte en richting van het magnetisch veld op een welbepaalde plaats binnen dit veld. De richting geeft aan naar welke richting een theoretisch minikompasje zou verdraaien. De grootte geeft aan met welke kracht dit kompasje in die richting zou worden geduwd.
De moderne SI-eenheid van de magnetische fluxdichtheid is de tesla met als symbool T. Als u deze eenheid wilt terugrekenen naar de fundamentele grootheden van het SI-stelsel komt u uit op 1 tesla = 1 Vs/m^2. De oude eenheid van magnetische fluxdichthied in het CGM-stelsel was de gauss (G). Eén tesla is gelijk aan 10.000 gauss.

De magnetische flux Φ
De magnetische flux Φ is de dichtheid van de magnetische veldsterkte B door een oppervlak A van 1 m dat loodrecht op het magnetisch veld staat. Deze flux wordt bijgevolg wiskundig als volgt gedefinieerd:
$\Phi = B \bullet A$
De gebruikte SI-eenheid is de weber (Wb). De oude eenheid in het CGS-systeem was de maxwell (Mx) met als omrekeningsfactor 1 Mx = 10^{-8} Wb.

De magnetische veldsterkte H
Dit is een vectorgrootheid die de sterkte van een magnetisch veld uitdrukt. De veldsterkte is dus een puur wiskundige grootheid die ons in staat het veld te beschrijven onafhankelijk van het medium.
In het SI-stelsel wordt de magnetische veldsterkte uitgedrukt in ampère per meter ofwel A/m. Een oudere eenheid in het CGS-stelsel is de oersted met als omrekeningsfactor 1 oersted = 1000/4π A/m. Dat is ongeveer 79,5775 A/m.
Het lijkt in eerste instantie misschien vreemd dat bij een magnetische grootheid de ampère komt kijken. In dit hele verhaal is immers met geen woord gerept over elektrische stroom. Dat is te verklaren uit het feit dat de definitie van de magnetische veldsterkte is afgeleid uit de theorie van het elektromagnetisme en daar speelt de elektrische stroom wél een belangrijke rol.

De BH-curve
Dit is een belangrijke eigenschap van ferromagnetisch materiaal. Het geeft het verband tussen de magnetische veldsterkte H die men door een ferromagnetisch materiaal stuurt en de magnetische fluxdichtheid B die in het materiaal ontstaat. Stel dat u een 'maagdelijke' staaf van ferromagnetisch materiaal onderwerpt aan een van nul stijgende magnetische veldsterkte H. Dan merkt u dat de magnetische fluxdichtheid B eerst toeneemt, maar vanaf een bepaalde waarde van H steeds minder snel gaat stijgen. Dat is de blauwe lijn in de onderstaande grafiek. Op een bepaald moment neemt de B-waarde zelfs niet verder toe en blijft gelijk aan Bmax. Men zegt dat het magnetisch materiaal verzadigd is, alle spins van de niet gepaarde elektronen zijn in dezelfde richting gericht.



De BH-curve van een ferromagnetisch materiaal. (© 2022 Jos Verstraten)

De remanente fluxdichtheid Br
Als u nu vervolgens de veldsterkte H weer laat dalen, zult u merken dat de B-waarde niet volgens dezelfde blauwe lijn afneemt, maar dat de lijn iets hoger ligt (groen). Zelfs bij volledig uitgeschakeld veld (H = 0 A/m) blijft er een bepaalde fluxdichtheid Br aanwezig. Dat noemt men de '*remanente fluxdichtheid*' Br.

Coërcitieve veldsterkte Hc
Om de fluxdichtheid weer op nul te krijgen moet u de richting van het veld zelfs omdraaien. H wordt dan negatief. De waarde van de veldsterkte -Hc waarbij de fluxdichtheid weer nul wordt noemt men de '*coërcitieve veldsterkte*'. Materialen met lage waarden van Hc en dus kleine hysterese lussen noemen men 'zacht magnetische materialen'. Als Hc zeer groot is spreekt men van 'hard magnetisch materialen'.

De magnetische permeabiliteit μ
De *absolute* magnetische permeabiliteit μ van een ferromagnetisch materiaal is de mate waarin het materiaal een magnetisch veld geleidt. Letterlijk betekent '*permeabiliteit*' doordringbaarheid. U zou het dus kunnen vergelijken met het begrip '*soortelijke weerstand*' uit de elektriciteitsleer.
Wiskundig bekeken wordt de magnetische permeabiliteit μ gedefinieerd als de verhouding tussen de magnetische fluxdichtheid B en het magnetisch veld H:
$\mu = B / H$
De *relatieve* magnetische permeabiliteit μr van een materiaal is een dimensieloos getal en is de verhouding tussen de absolute permeabiliteit van het materiaal en de absolute permeabiliteit van het luchtledige.
In normale mensentaal geeft de relatieve permeabiliteit van een materiaal een indruk over hoe veel gemakkelijker de magnetische veldlijnen door dat materiaal gaan dan door het luchtledige.